编者按　2021年第1期《中国科学院院刊》刊出“哲学助力科技创新”专题后，读者反响热烈，并引发了很多科学家的深思。对于哲学与科学的内在逻辑及其相互关系，哲学领域的学者和自然科学领域的学者对此持有不同的见解。基于此，本刊再次推出“哲学与科学”专题，展示自然科学领域的学者对哲学与科学关系的认知，以期引发读者对科学哲学更大的关注和讨论。

量子力学诠释与波普尔哲学的“三个世界”

孙昌璞

1 中国工程物理研究院研究生院　北京　100193
2 北京计算科学研究中心　北京　100193

摘要　基于“物质一元论”的观点，文章阐述了量子力学如何描述微观世界的客观属性。文章认为，由于采用了不具唯一性的波包塌缩假设，哥本哈根诠释对哲学基本问题构成的挑战并非根本性的，有人由此得到物质-意识不可分的结论在科学和哲学都是不严谨的。针对卡尔·波普尔“三个世界”哲学，文章基于量子测量理论描述了多个观察者如何对微观系统进行探测，形成客观的量子测量，产生微观世界的客观知识，从而对波普尔的客观知识世界（世界3）给出了基于量子力学本体论的哲学解读：物质世界（世界1）与精神感知世界（世界2）的物化载体（认识主体）相互作用，形成二者的关联和纠缠，它们对应了主观世界在内的精神感知全体，其中具有客观性的部分构成了微观世界的客观知识。文章还指出，伴随着微观系统客观知识世界的形成，信息从物质世界流向主观客体，信息流的指向定义了不同于通常物质世界的精神感知的物化载体。

关键词　物质一元论，哥本哈根诠释，三个世界，客观知识，客观量子测量

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.20210201003

1 哥本哈根诠释对“哲学基本问题”的挑战

在现代哲学的历史发展中，不少人把“有无独立于意识之外的客观世界”当作哲学的基本问题。虽然不同学派和不同时代的学者对此并无共识，但哲学家和科学家都对这种形而上学的追问保留了持久不衰的兴趣。1886年，恩格斯在《费尔巴哈与德国古典哲学的终结》[1]中首先指出，哲学基本问题是“思维和

资助项目：国家自然科学基金联合基金项目（U1930403）
修改稿收到日期：2021年2月26日

存在的关系”，“物质是第一性的”还是“认识是第一性的”。马克思和恩格斯的辩证唯物主义哲学坚持“物质是第一性的，认识是第二性，认识是生命客体对客观物质世界的反映”。这意味着，辩证唯物主义的基础是承认存在一个独立于认识之外的客观世界。

其实，以爱因斯坦为代表的大部分主流科学群体也认为，“相信有一个独立于感知主体的外在世界是所有自然科学的基础”[2]。在自然科学研究者看来，存在一个客观世界是一件自然而然的事，这与古典哲学的唯物论是相当契合的。然而，量子力学建立后，以玻尔为代表的哥本哈根学派提出了一种如今被称为“哥本哈根诠释”的量子力学诠释，这对物质意识关系提出了新的哲学挑战[3-10]。他们认为，经典的认识主体通过经典测量仪器观察微观世界，不可避免地引起量子力学的“波包塌缩”[11]①。由此导出，人类（观察者）的认识创造了微观世界，粒子属性并非客观存在。因此，电子之所以成为粒子是主观测量的结果，认识和物质世界是不可分的。有鉴于此，有人甚至宣称“月亮在被观测前实际上是不存在的”[12,13]。

玻尔等提出的量子力学哥本哈根诠释的核心思想是二元论的：量子力学描述微观世界必须辅以外部的不服从量子力学的经典世界，引发波包塌缩。然而，爱因斯坦、薛定谔等并不认同哥本哈根学派的观点，坚持对整个世界的一元论描述[13,14]。近 20—30 年，温伯格、格里菲斯和盖尔曼等也坚持“微观系统及其包括仪器和观察者的整个外部，都必须服从量子力学的幺正演化，无须引入不服从量子力学的经典仪器，最后让主观意识导致波包塌缩”[15-21]。沿循这个方向，测量过程的量子力学研究[22-31]，80 余年来积累了大量成果，基本动摇了哥本哈根学派的论证根基，维护了量子力学作为“物质一元论”的“尊严”。

20 世纪 90 年代伊始，针对“量子力学”的哥本哈根版本对物质和认识关系是否构成真正的哲学挑战，笔者从量子力学基本问题的研究入手，开展了具体而系统的科学研究[32-37]，基本上明晰了什么是微观世界测量结果的客观性（亦即微观客观性）[38,39]，以及为什么认识主体必须具有宏观特性才能导致经典概率性的观察结果（系统-仪器的经典关联）。这些研究佐证了爱因斯坦、薛定谔、温伯格、格里菲斯和盖尔曼等的真知灼见。我们通过具体的、但具有普适性的例子，演示了如何在保证幺正性的量子力学框架下，无须引入波包塌缩正确地描述量子力学的测量过程。特别是，我们检验了那些声称验证了波包塌缩的量子 Zeno 效应实验，并设计了相关的实验来检验量子测量理论中超越哥本哈根诠释的理论预言——临界测量时间[34-37]，进而从实验上否定了意识决定微观客体属性的主观断言。

从科学哲学的角度看，笔者与合作者系列研究工作的科学结论与卡尔·波普尔的“三个世界”理论有诸多思维逻辑上的契合[40-44]。本文将重点论述笔者与合作者开展的关于量子力学测量理论的研究与波普尔哲学的关系，并尝试从量子力学现代理论的角度理解波普尔“三个世界”理论中的世界 3——客观知识世界。

本文的分析基于没有波包塌缩的量子测量理论及其实验，是多世界诠释[45-50]和量子达尔文主义[22-24]的发展和延伸。从哲学上讲，理论采用“物质一元论”描述微观物质世界的客观属性。我们把宇宙物质世界分成两部分——欲研究的微观系统（S）和包括观察者在内的宏观外部世界（E），它们都属于世界 1。S 和 E 的特殊相互作用引起信息从 S 到 E 的等能单向流动，形成了 E 对 S 的非破坏测量，而且没有能量交换。E 的宏观性意味着 E 是多组分的；其每个组分测量 S 的某一属性，得到相同结果，这意味着包括

① 分布在不同空间点上的电子的物质波会定域塌缩到一个空间区域或特定点上，产生了具有确定的空间位置的粒子定域属性。

诸多观测者的外部世界形成了关于 S 的客观知识，从此 S 的客观属性就被确定下来。这种“物质一元论”描述的微观世界，其客观性不再如哥本哈根量子力学诠释所言，必须有外部认识主体的意识加以保证。

以上关于微观世界客观性的理解契合了波普尔的哲学观点：在物理世界（世界 1）和主观世界（世界 2）之外，存在客观的（思想）知识世界。主观世界（世界 2）不能代表客观知识。由各种感知构成的世界 2 是微观物质世界（世界 1′）与世界 2 的物化载体世界（世界 2′）相互作用的结果，可以表达为微观世界与载体世界间形成量子关联（纠缠），但这种关联具有不确定性[38]。世界 1′ 和世界 2′ 都属于物质世界（世界 1）。

需要指出的是，这种量子关联可以理解为载体物质对微观系统实施的预测量，结果只是代表某种感知，其全体构成感知世界（Z），而 Z 中具有客观性的部分就是我们关于微观系统的客观知识世界（世界 3）；Z 中不具有客观性部分，就是波普尔的主观世界（世界 2）（图 1）。因此，我们从量子测量理论的角度，明确定义了什么是关于微观世界的客观知识。

以上我们对波普尔客观知识世界的“量子”解读，不依赖于波包塌缩的假设，这个事实反过来也预示了波函数描述的微观属性是客观的。我们可以把客观知识世界当成通过知识进化形成的连接世界 1′ 和世界 2 的中介，它的存在导致了信息从世界 1′ 到世界 2 物化载体的单向流动（图 2）。

2 量子力学测量客观性诠释的哲学解读

关于量子力学哲学问题的讨论与争论通常集中在波函数是否具有本体论（ontology）的地位，是否可以代表物理实在（reality）。但自玻恩给出波函数概率诠释伊始[6,7]，波函数就开始被仅仅视为一个推断观察结果的数学工具，而非具有客观属性的物理实在，因而波函数也仅仅具有认识论（epistemology）的地位。爱因斯坦认为，当时的量子力学框架是认识论的，但最终会从一个终极的底层量子本体论推导出来，而这个量子本体论应当描述物理实在。事实上，沿着量子力学趋向本体论的发展方向，历史上有 3 种量子力学诠释。

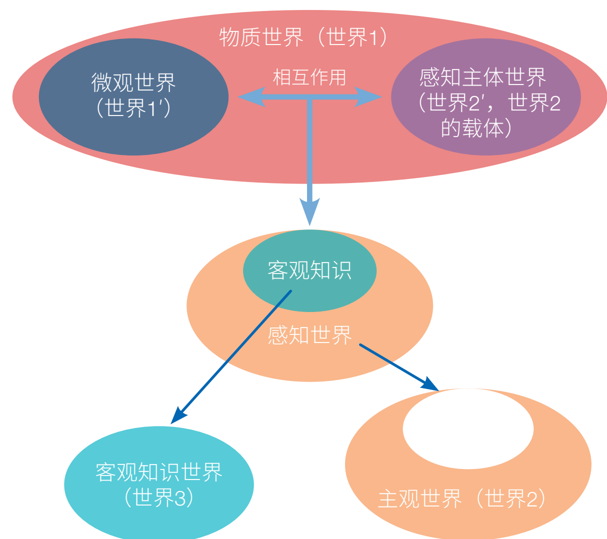


图 1　波普尔的世界图景

Figure 1　Frame of Popper’s three worlds

微观世界（世界 1′）与感知主体世界（世界 2′，世界 2 物化载体）相互作用产生了感知世界；感知世界中的客观知识世界（世界 3）可以由感知主体对世界 1 的客观测量所决定，其物理基础来自量子测量客观的严格定义；世界 1′ 与世界 2′ 同属于物质世界（世界 1）

The interaction between the microscopic World 1′ and the subjective Object 2′ (the materialized carrier of World 2) produces world of mental perception. The world of objective knowledge (World 3) in the world of mental perception can be determined by the objective measurement of World 1 by the subjective object, and its physical basis is derived from the objective and strict definition of quantum measurement. The microscopic World 1′ and the subjective Object 2′ belong to the material World 1

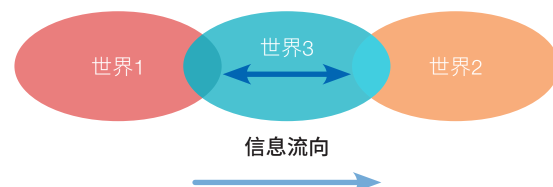


图 2　波普尔“三个世界”关系

Figure 2　Relationship between Popper’s three worlds

信息流指向定义了世界 2 的物质载体世界 2′

The direction of the information flow defines the materialized carrier of World 2

（1）哥本哈根诠释[3,4,8]。玻尔对波函数诠释也是认识论的，但他的出发点与爱因斯坦不同，其结果否定了微观世界的客观属性。玻尔认为，量子力学不能独立地描述微观属性，它对微观世界的刻画必须依赖包含不服从量子力学幺正性经典仪器的外部经典世界。其后不久，冯 · 诺依曼引入波包塌缩[11]，从数学上对语意不清、玻尔风格的哥本哈根诠释表述进行了精确化描述：微观系统必须辅以经典仪器这一要求，数学上表达为波包塌缩，它中断了波函数的幺正演化，测量使得波函数终结到一个“本体”的本征态上。需要指出的是，冯 · 诺依曼采用量子力学幺正性地描述仪器的做法本身是“物质一元论”的。但他的“物质一元论”和“本体论”并不彻底，这导致魏格纳建议了所谓的冯 · 诺依曼仪器链：在链终端上，最后的观察需要主观意识引发“系统+仪器链”的联合波包塌缩[11]。

（2）玻姆的隐变量诠释[51,52]。玻姆认为，波函数在认识论意义下给出的概率描述，本质是忽视了微观系统具有的但没有被考虑的隐变量的存在。由于观察者无法分辨由隐变量细分的底层量子状态，就只能对微观系统进行粗略的描述。这种粗粒化导致了通过波函数进行的描述是概率性的。需要强调，隐变量诠释并不介意是主观概率还是客观概率的，细化的波函数只是被当成隐变量的分布函数。

（3）埃弗瑞特（H. Everett）的多世界诠释[45-50]。埃弗瑞特 1955 年建议一个具有实在论意义的宇宙波函数-相对态（relative state），描述了包括微观系统及其所有外部要素的整体。给定基矢后，宇宙波函数是一个多体叠加态，其每一个分支对应一个被外部要素（如观察者、环境、仪器等）确定的微观态，因此它又是本体论的：处在这个分支中的观察者认识到这个态、处在这个分支中的仪器测量到这个态。多世界诠释无须引入任何量子力学以外的假设，可以自证不同分支上的观察者不能互通信息[46,47]。这种逻辑的证明并非形而上学，正如基于夸克的量子色动力学（QCD）可以通过夸克禁闭和渐进自证没有自由夸克出现一样。多世界诠释在量子宇宙学中得到广泛的应用，因为在一元论的框架下，它无须外部经典观察者波包塌缩，就可以说明为什么量子引力可以回归经典的广义相对论。

这 3 种量子力学诠释在科学发展的历史上有不同的境遇和命运。原教旨的玻姆隐变量诠释被 Bell 不等式的实验所否定；哥本哈根诠释中的波包塌缩因其在一元论和二元论摇摆的困境，多年被物理学界乃至哲学界诟病，特别是对于它误导的精神-物质不可分的断言，人们异议更多。事实上，波普尔在 1934 年出版的《研究的逻辑》（英文再版重命名为《科学发现的逻辑》）就对波包塌缩提出了严肃质疑[41]。波普尔把量子力学波函数诠释问题归结为基于分布的条件概率演算问题，不确定性关系只是来自 1 个实验中 1 组粒子的分布，与测量无关，自然就不存在波包塌缩。而把任何结果经典的概率性实现视为一种本体论的波包塌缩百害而无一利[53,54]。

在我们的量子测量理论中[38]，物质宇宙被分为两部分，被研究的系统 S 和它的外部世界 E。E 可以包括测量仪器 A、不同的观察者 O_j（$j=1,2,\cdots N$），以及它们所处的的环境。关于波函数的诠释我们采用多世界理论作为出发点，并更加关注研究的物理对象——量子力学描述的粒子构成的整个物质世界。从当代哲学角度看，我们发展的量子力学诠释可视为“物质一元论”或“物理一元论”，温伯格等也坚持这样的观点[13-17]：对于所研究的微观世界而言，它的环境和观察者也必须由量子力学的幺正性演化描述，而绝非如玻尔所言，必须由一个经典的外部引发波包塌缩。

在我们采用的“物质一元论”模型中，微观系统 S 和它的外部世界 E 都服从幺正演化的量子力学[39]。外部世界中的理想的测量仪器 A 与系统 S 相互作用，能够使得仪器 A 对系统 S 提取信息，但 S 不

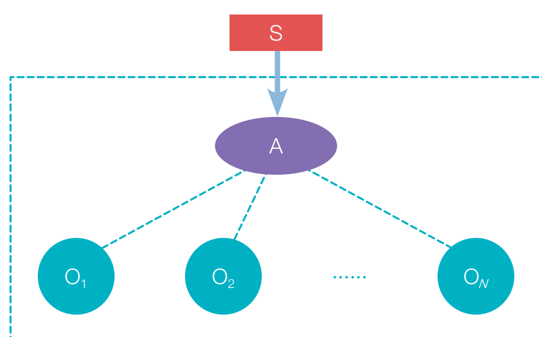


图3　多个观察者形成对微观系统的客观测量

Figure 3　Multiple observers lead to objective measurements of microscopic system

与A交换能量，改变自己的能量状态。A的存在会导致S与每个观察者O_j之间形成相同的经典关联（相对于一样基矢，关联系数一样）（图3）。这意味着不同观察者测量得到相同的结果，从而断言这个测量（相对于给定的力学量）结果是客观的。

我们的分析进一步理论表明，上述多方测量的客观性[38]，要求相互作用能够形成多模的GHZ态

$$|u\rangle=\sum C_n|n\rangle\otimes|A_n\rangle\otimes|O_1^n\rangle\otimes|O_2^n\rangle\otimes\cdots\otimes|O_N^n\rangle$$

$$\equiv\sum C_n|n\rangle\otimes|A_n\rangle\otimes|O_n\rangle。$$

其中，$|O_n\rangle=\prod_{j=1}^{N}|O_j^n\rangle$是观察者总体的状态。这里不必要求每一个因子内部态都正交，但因子化结构在宏观极限下（N趋近无穷），使得与每个系统态关联的观察者整体的态$|O_n\rangle$正交[32,33]。因此，约化掉仪器A和其他观察者的自由度可以形成S和O_j之间的经典关联

$$\rho_f^{SO}=\mathrm{Tr}_{AO'}(|u\rangle\langle u|)=\sum|C_n|^2|n,O_j^n\rangle\langle n,O_j^n|。$$

我们进一步证明，保证上述经典关联形成所需的相互作用（哈密顿量V）是非破坏的，即不引起系统能量状态的改变。

在客观量子测量理论中，仪器的另一个作用是充当不同观察者之间校对测量结果的工具，实现了不同观察者测量的统一标准，正如经典测量必备标度一样的尺子。当我们不计系统S和A的状态，则O_i和O_j之间形成形如上述公式的经典关联。这个关联意味着O_i和O_j可以对比它们对微观系统S的测量的结果，并取得了一致性意见。

以上分析表明，作为“物质一元论”，我们发展的理论摒弃了波包塌缩的主观臆想，继承和发扬了量子力学多世界诠释的精髓部分。我们对多世界诠释发展的要点是强调什么是客观的量子测量，什么是观察者整体的宏观性，及其对动力学耦合方式的具体要求。需要指出的是，上述讨论特别强调了测量仪器的作用：它提供了观察者测量微观系统的知识工具，选择了可以客观存在微观系统的基本属性，并且搭建了沟通微观世界和认识主体的知识桥梁。因此，在一定程度上来看，仪器是建立微观系统客观知识的关键。

3 微观世界客观知识的量子论基础

作为20世纪最伟大的思想之一，波普尔对人类面对的复杂世界进行了一次理性划分：作为世界1的物质世界、依托认识主体的精神世界（世界2）、作为人类认识产物的客观知识世界（世界3）。科学理论属于世界3。波普尔对世界的划分充分体现了他本人认识世界所坚持的实在论观点——坚持承认外部世界（包括知识在内）是客观实在的立场。波普尔认为，实在论不但与科学一致，也符合人们常识；否认外部存在的主观主义要对物理发展停滞的局面负责，“只有坚持把实在论作为科学研究纲领，物理学的大发展才有可能”[54]。

把客观知识（世界3）与世界1一样作为客观实在是波普尔的观点，也是他的立场。在波普尔看来，世界1是物理和物质的世界，物质、能量乃至生命有机体都属于这个世界，而世界2则包含心理、意识、感觉甚至幻想等思维现象。尽管世界2物化载体的世界2′属于世界1，但世界1不能完全取代世界2。世界3也属于精神认识领域，但它是其中客观的部分，不依赖于个体的意识和幻想。书籍和图书馆承载的人类知识即归属世界3，这是人类的共识。世界3具有固

定性，可以物化，可以传承，也可以作为外来文明根据逻辑关系加以破译。而世界 2 具有流动和不定性，无规律可循。例如，自由意志就难以物化。如果我们类比量子测量理论，把不定性的感知作为世界 1′ 和世界 2 物化载体的世界 2′ 相互作用形成世界 1′-2′ 量子纠缠的结果，其中环境迫使它变成确定的经典关联就是客观知识。

如果哲学不能在精神感知非物化领域区分出主观世界（世界 2）和客观知识世界（世界 3），波普尔的理性划分是没有意义的。为了克服这个哲学上的挑战，波普尔提出了知识进化论（evolution）的观点；他在回答客观知识是如何产生这样重大哲学问题，用科学的方法论代替传统的哲学认识论，从进化论的视角看待人类知识产生。与传统认识论方法简单地区分主观和客观、精神与物质的模式不同，波普尔不是简单地把精神感觉的东西对应于主观世界，而是通过内禀的证伪和反驳过程，通过多人多次不断试错，从精神和感觉中进化出有人类共识的客观知识。

波普尔认为，作为人类知识长期进化的产物，客观知识的进化也是达尔文式的，即：由无生命的物质进化出有机物，然后进化出生命，之后有感觉精神层面上的东西，最后进化出客观知识。对于不同的个体而言，可能千差万别，但通过自然试错，与外部世界比对，能够正确刻画世界 1 的感知作为共性的东西保留下来，而那些与世界偏差大的“知识”被淘汰，最后保留下来的精神感觉为不同的认识主体所认可，形成了客观知识。与量子测量理论类比，为了形成关于微观系统的客观知识，多个观察者一起独立地测量微观系统，等价于同一个观察者在不同时序上多次观察（校验）相对稳定的微观客体。其实，根据维纳-辛钦（Wiener-Khinchin）定理，对稳态系综测量的统计平均等价于对 1 个单一系统多次测量的时间平均（图 4）。因此，在时间域上的进化和在空间域上自然选择在这个意义下是一致的。

以上关于“三个世界”划分及其客观知识世界（世界 3）产生和进化的描述，与量子测量理论对测量客观性及其量子达尔文主义的陈述完全一致。这种契合绝不是偶然，它事关如何站在微观角度、从量子力学出发描述微观世界知识产生的根本问题，以及如何从基本物理学的角度去佐证哲学上客观知识的物化存在；进而，启发我们进一步理解量子力学波函数诠释的物理意义，如何对待量子力学中的测量问题，以及如何认识微观世界基本属性的客观存在。

4 微观世界的客观知识的量子进化

量子力学多世界诠释本质上是本体论的，是我们发展现代量子测量理论的出发点。通常把测量理解为相互作用产生仪器和被测系统间经典关联，它给出关于人们通过仪器得到系统的广义知识。然而，经典关联和量子纠缠都是依赖于基矢选择，也就是说测什么样的物理量，而这些物理量反映了微观系统的客观属性。然而，微观属性通常不是事先预设好的。今天看来，1922 年完成的斯特恩-盖拉赫（Stern-Gerlach）实

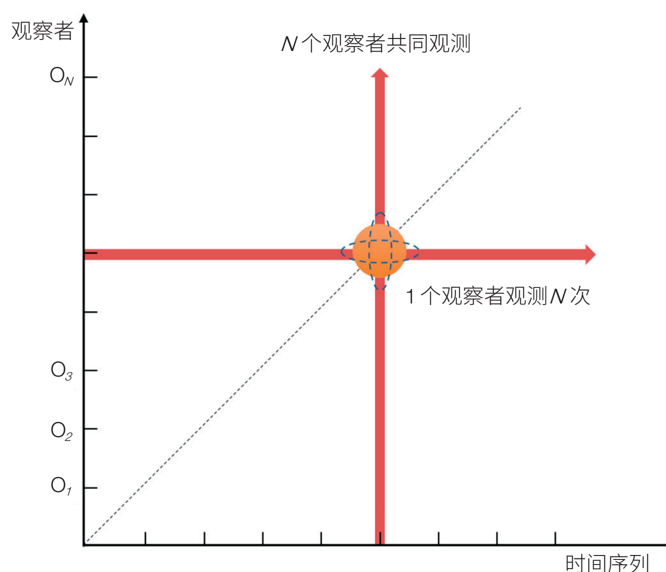


图 4　维纳 - 辛钦关于稳态系统的统计平均与单一系统时间平均等价

Figure 4　Wiener-Khinchin theorem stating equivalence of statistical average of steady-state ensemble and time average of single system

验（图 5）本质上用底片上空间的亮斑点测量了银原子的自旋（1925 年提出）。看上去该实验默认了自旋是粒子（电子）的一个客观属性，但当年斯特恩-盖拉赫实验完成前并未明确电子有自旋的这种属性，只是原子在磁场中的取向量子化是事先知道的，基态银原子基态轨道角动量为零，“取向”就只能由自旋实现了，于是自旋这个属性就被展现出来。因此，作为电子的一个客观属性，自旋的概念是进化出来的。

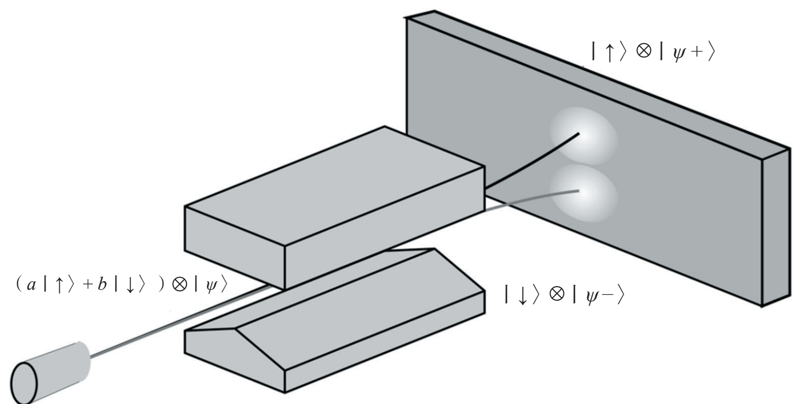


图 5　斯特恩 - 盖拉赫实验与电子自旋的客观属性

Figure 5　Stern-Gerlach experiment and objective properties of electron spin

谈论微观系统 S 的客观属性如何进化和衍生（emerge）出来，离不开量子客观性的一般讨论——量子达尔文主义[22-24]。由于不同于经典系统属性不受测量的影响，微观系统的属性事先人们并不知晓。Zurek 等[22-24]认为，微观系统的客观属性不能事先预设，而是把各种性质置于其外界包括各种观察者的环境加以比较选择，那些与外界互信息最大的自由度②就是微观系统 S 的客观属性。在我们发展的理论中，广义的环境 E 可看成由 N 个独立观察者组成，S 与 E 互信息最大，意味着它与每个观察者独立形成了最大的经典关联，也就是说多个观察者测得了相同的结果，实现了对 S 的客观量子测量[38]。如前者所述，把“多个观察者共同观测到相同的结果”这一客观测量与“一个观察者对有规律演化的微观系统在时间序上进行 N 次测量”等同。这意味着一个观察者可以通过多次观测获得微观世界的客观知识，这与波普尔知识进化的图景完全一致。

一方面，无论是我们发展的客观的量子力学测量理论[32,33]，还是波普尔的知识进化理论[42]，都存在类似于“先有鸡还是先有蛋”的形而上学问题。先根据实验和经验指定 P 是世界 1 的属性，通过多方共同或单方多次观察确定客观性程度，从而判定测量是否客观。属性 P 是否具有客观性却是由测量本身是否客观来定义，一定程度上存在逻辑自洽的问题。波普尔建议用“试错、证伪”的办法解决这个逻辑循环问题[43]。物理上，我们先假定了 S 具有属性 P_0，在 P_0 的基矢下，检验是否有客观的测量结果；如果存在偏差，就根据它修正 P_0 为 P_1，P_2，……，直至最后得到 P。这个思想方法对于进一步发展客观的量子测量理论有重要启发作用。

另一方面，我们发展的理论可以对波普尔基于客观多元论的“三个世界”理论给出“物质一元论”的解读：相对于微观世界 S，包括所有观察者在内的外部 E 载体也是物质，认识和感知微观世界 S 可以看成 S 与 E 的相互作用产生的 S 与 E 之间复杂的关联。特殊相互作用可以导致 E 对 S 认知是客观的——不同观察者测得了相同的微观属性，从而导致了世界 3（客观知识）的产生。至于如何选择欲研究的微观属性，我们需要波普尔倡导的在一个时序上试错和证伪。

这个试错式证伪的方法，对于稳态系综相当于量子达尔文主义。什么是系统 S 的微观属性由整个外部环境决定，而外部环境有冗余的自由度，可分成若干

② 自由度：可观测量，在量子力学中由指定的基矢代表

个子系统，每个子系统 O_j 相当于一个观察者，其他的观察者子系统使得 O_j 与 S 的交互信息相对于给定这个基矢作为本征态，对应观察量就代表了微观客体的基本属性。

总之，在我们描述的世界图景中，微观世界是一个物理实在，认识主体也是物理实在。怎样区分两种物质实在的差别需要考虑量子退相干与不可逆性：信息的流动方向所指地方就是衍生认知功能的认识主体，它具有宏观不可逆的特征。事实上，我们想象有 N 个独立的观察者 O_j（j=1,2,…N）共同测量系统 S，他们各自通过与 S 的相互作用观测 S 的某种属性。由于幺正演化导致 S-O_j 纠缠态以不同周期的快速随机变化，每个 O_j 与 S 产生的最大经典关联的时刻

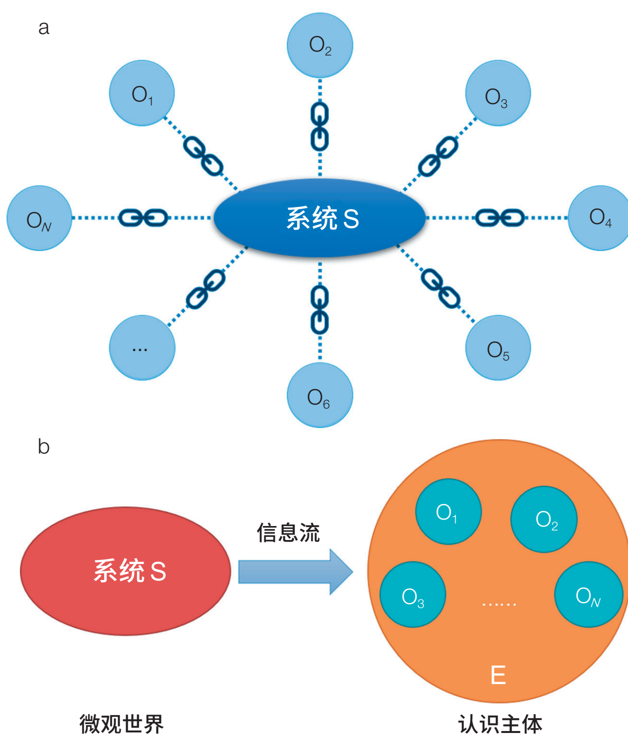


图 6　信息单向流的形成与认知

Figure 6　Formation of unidirectional information flow and cognition

（a）系统与观察者间纠缠态按不同周期的快速随机变化；（b）信息流动方向定义了衍生认知功能的认识主体，展示了认知的不对称性

(a) Rapid random variation of entanglement between system and observer at different periods; (b) Direction of information flow defines cognitive subject emerging cognitive function and shows asymmetry of cognition

不同（图 6a）。因此，观察者间的细微差异使得它们不能在同一时刻获得最大信息。因此平均地看来，信息展示了认知的不对称性、不可逆地流向认识主体（图 6b），而各自信息同时回归的可能性极小。

另外，伴随信息流动的不可逆过程，对于作为开放系统的微观世界，观察和测量过程从纯态的微观世界提取负熵——信息，从而是一个熵增加过程。认识主体的宏观性引发了这种不可逆性。客观性要求必须有宏观多的观察者（N→∞），导致了量子系统的退相干[29-32,55]。最近有人宣称人类的认识中的第六感与量子纠缠有关，因为量子纠缠在生命系统中已经存在了千百万年。然而，人作为认识主体必须是宏观的。已有研究表明[30]，宏观物质相干性（量子纠缠是一种多体量子相干，更不易存活）在 10^{-23} 时间尺度上完全消失了。

5 结语：当代哲学与量子力学融合在微观世界

本文从量子测量客观性的具体科学研究工作出发，探讨了如何基于“物质一元论”解读波普尔“三个世界”哲学中客观知识世界（世界 3）的科学内涵。笔者的研究与探索有双重意义：① 对于量子力学诠释而言，波普尔的客观知识世界产生与进化机制研究，启迪我们可以从“试错、证伪”的进化观点入手去发现微观世界的客观属性，从哲学上的知识进化的视角理解量子达尔文主义，从而帮助我们在量子力学的观念框架中排除了“二元论”的波包塌缩假说，消除被不少人误解的“量子力学支持精神物质不可分”的荒诞结论。② 从科学哲学的角度看，联系波普尔“三个世界”哲学基础，我们对微观系统客观知识世界给出了“物质一元论”的解读——通过量子测量客观性理论的分析，强调了世界 3 必须有物化载体的观念。这种载体与世界 1 的一部分相互作用，形成不定性的纠缠或关联，构成了精神感知的集合，其中客观和不客观（通过量子力学严格定义）的部分分别构成

了世界 3 和世界 2。信息在“三个世界”中传播和流动，流动指向感知世界的载体——一个特别的物理世界。

笔者的研究和探索还表明，现代哲学与自然科学之间的关系，不是指导和被指导关系，而是相互依存、相互促进。认为具体科学研究中哲学无用的论点不仅失之偏颇，而且狭隘短见；对自然科学研究提出的认识论等方面问题的不屑和无力一顾，则会使中国当代哲学的发展流于空泛，加大我国科学哲学落后于世界的距离。其实，对于哲学上的新观念、新思想，现代科学可以给出基于具体理论，甚至科学实验上的“可证伪”学术支撑；对于自然科学中面临的基本问题，当代哲学可以帮助科学家们在“山穷水尽疑无路”之时“仰望星空”，进入从根本上解决问题“柳暗花明又一村”的新境界[56-59]。

致谢　感谢张慧琴在文字写作方面的诸多协助，感谢30余年在量子力学基础研究的艰辛探索中许多与笔者长期合作的学生和同事，也感谢刘闯和郝刘祥对本文提出的非常有价值的学术意见。

参考文献

1 恩格斯. 费尔巴哈与德国古典哲学的终结. 北京: 人民出版社, 1949.

2 爱因斯坦. 爱因斯坦文集. 许良英, 译. 北京: 商务印书馆, 2010.

3 派斯. 玻尔传. 戈革, 译. 北京: 商务印书馆, 2001.

4 派斯. 基本粒子物理学史. 关洪, 杨建邺, 王自华, 等, 译. 武汉: 武汉出版社, 2002.

5 彭桓武. 量子理论的诞生和发展——从量子论到量子力学. 物理, 2001, 30(5): 265-270.

6 Born M. The quantum mechanics of the impact process. Zeitschrift für Physik, 1926, 37: 863-867.

7 Born M. Quantum mechanics in impact processes. Zeitschrift für Physik, 1926, 38: 803.

8 海森堡. 量子论的物理原理. 王正行, 译. 北京: 高等教育出版社, 2017.

9 卡西第. 海森伯传. 戈革, 译. 北京: 商务印书馆, 2002.

10 Heisenberg W. The development of quantum mechanics, Nobel Lecture. (1933-11-11) [2021-02-18]. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1932/heisenberg-lecture.html.

11 von Neumann J. Mathematical Foundations of Quantum Mechanics. Princeton: Princeton University Press, 1955.

12 Jammer M. The Conceptual Development of Quantum Mechanics. New York: MacGraw Hill Book Compony, 1966.

13 玻恩, 爱因斯坦. 玻恩-爱因斯坦书信集（1916—1955）: 动荡时代的友谊、政治和物理学. 范岱年, 译. 上海: 上海科技教育出版社, 2010.

14 约翰·格里宾. 量子、猫与罗曼史: 薛定谔传. 匡志强, 译. 上海: 上海科技教育出版社, 2013.

15 Weinberg S. Einstein's mistakes. Physics Today, 2005, 58(11): 31.

16 温伯格. 我为什么对量子力学不满意. (2016-11-23)[2021-02-18]. https://huanqiukexue.com/a/qianyan/tianwen__wuli/2016/1123/26804.html.

17 Weinberg S. Lectures on Quantum Mechanics (2nd Ed). New York: Cambridge University Press, 2015.

18 Griffiths R B. Consistent histories and the interpretation of quantum mechanics. Journal of Statistical Physics, 1984, 36(1/2): 219-272.

19 Griffiths R B. Consistent Quantum Theory. New York: Cambridge University Press, 2003.

20 Gell-Mann M, Hartle J B. Quantum Mechanics in the Light of Quantum Cosmology. Reading: Addison-Wesley, 1990.

21 Gell-Mann M, Hartle J B. Classical equations for quantum systems. Physical Review D, 1993, 47(8): 3345-3382.

22 Zurek W H. Decoherence, Einselection and the quantum origin

of the classical. Reviews of Modern Physics, 2003, 75(3): 715-775.

23 Zurek W H. Pointer basis of quantum apparatus – into what mixture does the wave packet collapse. Physical Review D, 1981, 24(6): 1516-1525.

24 Ollivier H, Poulin D, Zurek W H. Objective properties from subjective quantum states: Environment as a witness. Physical Review Letters, 2004, 93(22): 220401.

25 Hepp K. Quantum theory of measurement and macroscopic observables. Helvetica Physica Acta, 1972, 45: 237-248.

26 Bell J S. On Wave Packet Reduction in the Coleman-Hepp Model. Helvetica Physica Acta, 1975, 48: 93-98.

27 Namiki M, Pascazio S. Wave-function collapse by measurement and its simulation. Physical Review A, 1991, 44(1): 39-53.

28 Nakazato H, Pascazio S. Solvable dynamical model for a quantum measurement process. Physical Review Letters, 1993, 70(1): 1-4.

29 Zeh H D. On the interpretation of measurement in quantum theory. Foundations of Physics, 1970, 1(1): 69-76.

30 Joos E, Zeh H D. The emergence of classical properties through interaction with the environment. Zeitschrift Für Physik B Condensed Matter, 1985, 59(2): 223-243.

31 Joos E, Zeh H D, Kiefer C, et al. Decoherence and the Appearance of a Classical World in Quantum Theory. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2003.

32 Sun C P. Quantum dynamical model for wave function reduction in classical and macroscopic limits. Physical Review A, 1993, 48(2): 898-906.

33 Sun C P, Yi X X, Liu X J. Quantum dynamical approach of wavefunction collapse in measurement process and its application to quantum zeno effect. Fortschritte der Physik-Progress of Physics, 1995, 43(7): 585-612.

34 Xu D Z, Ai Q, Sun C P. Dispersive-coupling-based quantum Zeno effect in a cavity-QED system. Physical Review A, 2011, 83(2): 022107.

35 Ai Q, Xu D Z, Yi S, et al. Quantum anti-Zeno effect without wave function reduction. Scientific Reports, 2013, 3: 1752.

36 Harrington P M, Monroe J T, Murch K W. Quantum Zeno effects from measurement controlled qubit-bath interactions. Physical Review Letters, 2017, 118: 240401.

37 Zheng W Q, Xu D Z, Peng X H, et al. Experimental demonstration of the quantum Zeno effect in NMR with entanglement-based measurements. Physical Review A, 2013, 87(3): 032112.

38 Li S W, Cai C Y, Liu X F, et al. Objectivity of quantum measurement in many-observer world. Foundations of Physics, 2018, 48(6): 654-667.

39 Tipler F J. Quantum nonlocality does not exist. PNAS, 2014, 111(31): 11281-11286.

40 波普尔. 科学发现的逻辑. 查汝强, 邱仁宗, 万木春, 译. 杭州: 中国美术学院出版社, 2008.

41 波普尔. 科学发现的逻辑后记. 李本正, 刘国柱, 译. 杭州: 中国美术学院出版社, 2014.

42 波普尔. 客观的知识: 一个进化论的研究. 杭州: 中国美术学院出版社, 2003.

43 波普尔. 猜想与反驳: 科学知识的增长. 杭州: 中国美术学院出版社, 2010.

44 波普尔. 实在论与科学的目标. 杭州: 中国美术学院出版社, 2008.

45 Everett H. “Relative State” Formulation of quantum mechanics. Reviews of Modern Physics, 1957, 29(3): 454-462.

46 DeWitt B, Graham N. The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics. Princeton: Princeton University Press, 1973.

47 Northey M, Mckibbin J. Many Worlds: Everett, Quantum Theory, & Reality (Reprint Edition). New York: Oxford University Press, 2012.

48 Wallace D. The Emergent Multiverse: Quantum Theory according to the Everett Interpretation Reprint Edition. New York: Oxford University Press, 2014.

49 Byrne P. The Many Worlds of Hugh Everett III: Multiple Universes, Mutual Assured Destruction, and the Meltdown of a Nuclear Family. New York: Oxford University Press, 2010.

50 Lehner C. The Everett Interpretation of Quantum Mechanics: Collected Works 1955-1980 with Commentary. Princeton: Princeton University Press, 2012.

51 Bohm D. A Suggested interpretation of the quantum theory in terms of "hidden" variables. I. Physical Review, 1952, 85(2): 166-179.

52 Bohm D. A suggested interpretation of the quantum theory in terms of "hidden" variables. II. Physical Review, 1952, 85(2): 180-193.

53 Peres A. Popper's experiment and the Copenhagen interpretation. Studies in History and Philosophy of Modern Physics, 2002, 33 (1): 23-24.

54 波普尔. 波普尔自传：无尽的探索. 赵月瑟, 译. 北京：中央编译出版社, 2009.

55 Brune M, Hagley E, Dreyer J, et al. Observing the progressive decoherence of the "meter" in a quantum measurement. Physical Review Letters, 1996, 77(24): 4887-4890.

56 白春礼. 架构科学家与哲学家的思想桥梁，为人类科技事业贡献新智慧. 中国科学院院刊, 2021, 36(1): 3-9.

57 朱菁. 哲学能够成为科技创新的"助产士"吗？. 中国科学院院刊，2021, 36(1): 10-16.

58 刘闯, 朱科夫. 国际哲学与科学交叉学科研究进展评述. 中国科学院院刊, 2021, 36(1): 17-27.

59 郝刘祥. 哲学与物理学相遇在量子世界. 中国科学院院刊, 2021, 36(1): 28-35.

Interpretation of Quantum Mechanics and Karl Popper's Three Worlds

SUN Changpu

(1 Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100193, China;

2 Beijing Computational Science Research Center, Beijing 100193, China)

Abstract Base on the view of material monism, this paper explains how quantum mechanics describes the objectivity of the microscopic world. It points out that the challenge posed by the Copenhagen interpretation to the fundamental problem of philosophy is not essential, due to its adoption of the wave-packet collapse hypothesis which is non-unique to implement repeatable measurement. Therefore, the conclusion that matter and consciousness are inseparable is not rigorous either from scientific or from philosophical perspective. With regard to Karl Popper's philosophy of "three worlds", our quantum theory of measurement describes how the multiple observers probe into the micro system to obtain the objective knowledge about the microworld with objective quantum measurements, thus gives an ontological interpretation to the objective knowledge world (World 3) of Popper: the material world (World 1) interacts with the materialized carrier of spiritual perception world (World 2), forming the correlations or entanglements between the two worlds. These correspond to all mental perception including the subjective world. Here, the objective part, which can be defined by the objective quantum measurement, constitutes the objective knowledge world (World 3) of micro system. As the objective knowledge world emerges, the information flows from the material world to the subjective object. The direction of information flow defines the materialized carrier of spiritual perception, that is different from the usual material world.

Keywords material monism, Copenhagen interpretation, three worlds, objective knowledge, objective quantum measurement



孙昌璞　中国科学院院士，发展中国家科学院院士。中国工程物理研究院研究生院院长，北京计算科学研究中心教授。长期从事量子物理、数学物理及量子信息基础理论研究。近年主要从事有限系统和生命过程中的量子相干效应和复杂系统的可靠性等研究，积极探索国家需求牵引的基础研究模式创新。国家自然科学基金委员会委员和国家自然科学基金第七届“理论物理专款”学术领导小组组长，中国科学院哲学研究所学术委员会主任。组织参与我国物理学科战略规划工作，如《未来10年中国学科发展报告·物理学》《国家自然科学基金委员会物理领域“十三五”规划》等。发表学术论文300余篇，被引用近14 000次。荣获国家自然科学奖二等奖和美国科学信息研究所（ISI）“经典引文奖”等奖励，以及全国先进工作者等荣誉称号。E-mail: suncp@gscaep.ac.cn

SUN Changpu　Member of Chinese Academy of Sciences (CAS), Member of the World Academy of Sciences for the advancement of science in developing countries (TWAS), Dean of Graduate School of China Academy of Engineering Physics, and Professor of Beijing Computational Science Research Center. His research interests include quantum physics, mathematical physics, and quantum information processing. In recent years, he mainly explored photon transmission in low-dimensional structures, quantum coherence effects in biological processes, and reliability of complex systems, etc. He is also exploring the model innovation of basic research driven by national demands. At present, he is a member of the National Natural Science Foundation of China (NSFC), leader of the Academic Leading Group for the seventh Theoretical Physics Special Fund of NSFC, and also director of the Academic Committee of the Institute of Philosophy, CAS. He has participated in the strategic planning of China's physics discipline, such as "China's Discipline Development Report in the Next 10 Years—Physics" and "13th Five-Year Plan for Physics of National Natural Science Foundation of China". He has published more than 300 academic papers, with nearly 14 000 times cited. He achieved many prizes including the second prize of National Natural Science Award in China, Citation Classic Award by Institute for Scientific Information (ISI), the National Model Employee of China, etc. E-mail: suncp@gscaep.ac.cn

■责任编辑：张帆